

*Лунёв А.А., аспирант,
Сиротюк В.В., д-р техн. наук, проф.*
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ИЗ ЗОЛОШЛАКОВОЙ СМЕСИ*

lunev.al.al@gmail.com

Для полномасштабного использования отходов тепловых электростанций – золошлаковых смесей, в качестве строительного материала земляного полотна автомобильных дорог необходимо обосновать их механические характеристики, в частности – модуль упругости этого техногенного грунта и его изменение в зависимости от влажности. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению несущей способности (модуля упругости) насыпи земляного полотна из золошлаковой смеси от сжигания углей Экибастузского бассейна. В ходе исследований проводились штамповые испытания, при этом влажность земляного полотна искусственно изменялась. В результате установлена зависимость величины модуля упругости ЗШС в теле насыпи от влажности этого техногенного грунта. Дополнительно проведено сравнение результатов определения величин этого показателя, полученных на лабораторных образцах и в натуральных условиях.

***Ключевые слова:** автомобильные дороги, земляное полотно, золошлаковая смесь, несущая способность, модуль упругости.*

Введение. Повышение объёмов промышленного производства вызывает постоянное увеличение потребности страны в тепло- и электроэнергии. Несмотря на усилия по разработке новых источников энергии, на большей части Сибирского, Уральского и Дальневосточного федеральных округов энергия генерируется на тепловых электростанциях (ТЭС) за счёт сжигания ископаемых углей. При этом способе производства энергии образуется огромное количество отходов (до 45 % от количества сжигаемого угля) в виде золошлаковых смесей (ЗШС), которые складировать в специализированных отвалах. Поскольку переход на новые источники энергии является делом отдалённой перспективы, в ближайшие десятилетия количество золошлаковых отходов будет только увеличиваться и, по прогнозам, к 2030-му году их количество в РФ достигнет 2,0 млрд. тонн.

В то же время в крупных городах РФ остро стоит вопрос нехватки кондиционных грунтов для сооружения земляного полотна автомобильных дорог и выполнения вертикальных планировок территорий для промышленного и гражданского строительства. Поскольку стоимость пригородных земель очень высока, под карьеры выделяют участки с переувлажнёнными глинистыми грунтами, как правило, расположенные за десятки километров от строящихся объектов. Это не только увеличивает стоимость этих объектов, но и усложняет производство работ, может снижать качество конструкции.

Многолетний иностранный и отечественный опыт показывают возможность эффективной утилизации ЗШС в строительстве [1, 2], в том числе при возведении земляных сооружений [3–7]. Однако имеются данные о существенных различиях в механических свойствах ЗШС разного генезиса [8, 9]. Поэтому мы выполняем комплексные исследования по определению механических характеристик (в том числе модуля упругости) ЗШС от сжигания Экибастузских углей, которые другими авторами ранее не выполнялись.

Методика испытаний. Несущая способность дорожной конструкции характеризуется эквивалентным модулем упругости её конструктивных слоёв. Для изучения модуля упругости золошлаковых смесей в натуральных условиях был построен опытный участок автомобильной дороги с земляным полотном из ЗШС. Конструкция земляного полотна представляет собой насыпь высотой 1,20 м, протяжённостью 12,0 м с шириной проезжей части 4,0 м. Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка приведён на рис. 1.

Для возведения земляного полотна использовали ЗШС (от сжигания Экибастузского угля) с влажностью 40 % из отвала ТЭЦ-5 г. Омска. Насыпь отсыпалась и разравнивалась слоями толщиной по 0,30 м с уплотнением виброплитой и виброкатком до $K_{умл} = 0,95$ [10].

Среди всех методов определения модуля упругости конструктивных слоёв в дорожной от-

расли наибольшее распространение получил метод штамповых испытаний. Модуль упругости земляного полотна опытного участка оценивался

дважды – после его возведения, в июле 2010 г, и в июле 2017 г.

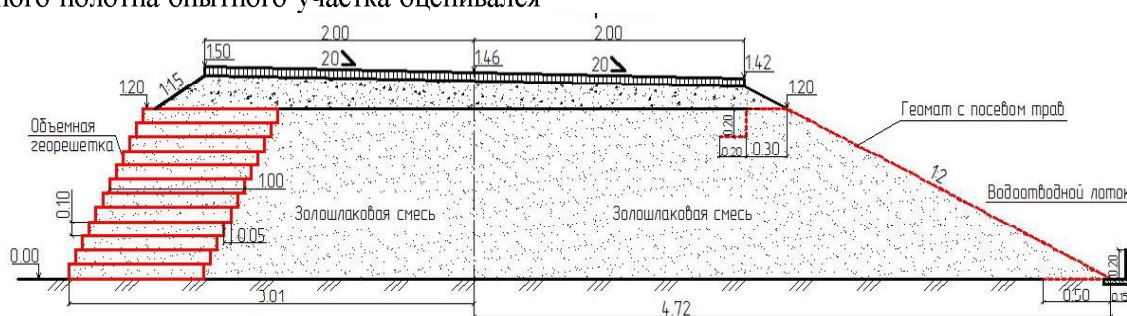


Рис. 1. Поперечный профиль дорожной конструкции опытного участка

Первый цикл испытаний проводили по методике Э.В. Костерина [11]. Измерение модуля упругости выполняли путём установки жёсткого штампа на поверхности земляного полотна в трёх точках участка.

Доведение ЗШС до влажности, соответствующей расчётному периоду, осуществляли путём увлажнения земляного полотна посредством дождевания поверхности. Для испытаний применялся жёсткий металлический штамп диаметром

0,33 м. Нагрузка передавалась посредством гидравлического цилиндра с максимальным усилием 40 кН, который был установлен в подрессоренную часть грузового автомобиля. Нагрузку прикладывали ступенями по 0,05 МПа до достижения максимального расчетного значения 0,3 МПа. Процесс выполнения испытаний изображен на рисунке 2.



Рис. 2. Проведение штамповых испытаний на поверхности земляного полотна из ЗШС: а – установленный на насыпе автомобиль; б – измерение осадок штампа при нагружении

Отбор проб для определения влажности осуществляли с верхней части земляного полотна. Определение влажности ЗШС после испытаний проводили по методу высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180-2015 [12].

Второй цикл испытаний выполняли по методике ОДМ 218.5.007-2016 [13]. Испытания проводили в четырех точках земляного полотна. Перед испытаниями были сделаны вырубki в покрытии и основании.

Для второго цикла штамповых испытаний использовался жёсткий пресс-штамп ПШ-050С диаметром 300 мм, нагружаемый при помощи гидравлического цилиндра с максимальным усилием 50 кН. Домкрат устанавливали в подрессоренную часть загруженного автомобиля марки ЗИЛ-130. Индикаторы часового типа ИЧ-10 крепили к стальной балке, не допускающей переме-

щений под действием ветра, нагрузок и случайных прикосновений к ней. Размещение штампа в лунке и его крепление к автомобилю показано на рис. 3.

Нагрузку на штамп прикладывали ступенями, как указано в [13], контроль нагрузки вели с помощью электронного динамометра ДЭП/3-1Д-50С-2. При ступени 0,33 МПа, были отмечены предельные для испытаний деформации (5,0 мм), поэтому нагружение проводили только до этого уровня. После достижения максимальной нагрузки, производили разгрузку нагрузочной плиты в три ступени до уровней 50 %, 25 % и 2 % от максимальной нагрузки. На завершающей стадии эксперимента выполняли вторичное нагружение, без ступени, с максимальной нагрузкой. По полученному в результате графику испытаний штамповой установкой и определяли модуль упругости. По результатам

статистической обработки, некоторые значения выборки исключались.

После испытаний земляного полотна с природной влажностью было проведено его водонасыщение посредством подачи воды через шланг в лунку (см. рис. 3а).



Рис. 3. Проведение штамповых испытаний земляного полотна из ЗШС:
а – водонасыщение золошлаковой смеси перед испытанием; б – установка нагружающего устройства;
в – измерение осадок штампа при нагружении

В процессе проведения эксперимента была отмечена следующая особенность. При увлажнении земляного полотна приходила потеря воды не только за счёт частичного испарения, но и за счёт значительного дренирования влаги в нижележащие слои ЗШС. Несмотря на низкий коэффициент фильтрации ЗШС (0,02 м/сут.), влажность этого материала в течение суток падала с 50 до 30 % по массе, а ещё через сутки до 20 %. Наблюдения на протяжении двух недель показали, что влажность ЗШС стабилизировалась на уровне 18 %. Это подтверждает ранее выдвинутое положение [10] о быстром сбросе излишней влаги из ЗШС, до уровня, близкого к оптимальной.

Результаты определения модуля упругости. Испытания в 2010 г. году проводились однократно в трёх точках, только при естественной влажности.

В ходе испытаний в 2017 г. было выполнено пять циклов испытаний в течение года, в каждом из которых измерение проводили в четырёх точках. Модуль упругости определяли по формуле:

$$E = 0,75 \cdot D \frac{\Delta\sigma^{v2}}{\Delta s^{v2}} \quad (1)$$

где $\Delta\sigma^{v2}$ – приращение нагрузки, создаваемой штампом по ветви вторичного нагружения при росте от 30 до 70% от максимального её значения, МН/м²;

Δs^{v2} – приращение осадки, штампа по ветви вторичного нагружения при росте нагрузки от 30 до 70 % от максимальной нагрузки.

Далее проводили повторные испытания по вышеуказанной методике. Контроль полученной влажности ЗШС проводили по [12] путём отбора проб после испытаний. Отбор проб осуществляли с поверхности и путём вертикального бурения земляного полотна для получения образцов с глубины 0,4 м и 0,8 м. Для каждой лунки отбирали не менее 9 образцов на влажность.

Результаты первого и второго испытания, обработанные по методике ОДМ 218.5.007-2016 [13], приведены в таблице 1.

Результаты экспериментов показывают существенное влияние влажности на несущую способность ЗШС. Этот факт ранее отмечался в исследованиях *Pandian* [8]. Он определял CBR (калифорнийское число несущей способности) отвалных шлаков, золы-уноса и топливного шлака при насыщении их водой и получил похожие результаты. Сравнить данные из его работы с результатами наших испытаний можно в силу наличия прямой связи модуля упругости и CBR [14].

Существенное снижение модуля упругости ЗШС при увлажнении так же подтверждается опытами *Toth et al* [14], в которых обнаруживается снижение несущей способности этого техногенного грунта при водонасыщении в 1,43–1,99 раза, в зависимости от условий испытаний. Подобное поведение характерно для большинства природных грунтов, что подтверждается опытами *Н.Н. Маслова* [16].

Установлено, что изменений несущей способности насыпи из ЗШС за семь лет (с 2010 г.) практически нет, несмотря на многочисленные природные деструктивные воздействия (водонасыщение – высушивание, замораживание – оттаивание). Не изменилась и первоначальная плотность ЗШС ($K_{vnl} = 0,95$). Следовательно, увеличение прочности ЗШС со временем, отмеченное в работе *Н.И. Барац* [17], характерно для ЗШС в отвале, уложенной гидромеханизированным способом с постепенным отводом избыточной влаги и

возможным возникновением слабых конденсационно-кристаллизационных связей.

Результаты натурного эксперимента на насыпи сравнивали с результатами лабораторных исследований, проведённых по методике ВСН 29-

76 [18] в рамках предыдущих исследований [19]. На графиках (рис. 4) представлено сравнение результатов лабораторных и натуральных испытаний ЗШС.

Таблица 1

Модуль упругости на поверхности земляного полотна из ЗШС

Номер точки	Влажность материала, % по массе				Относительная влажность	Модуль упругости E_y , МПа
	0,0 м	0,4 м	0,8 м	Средняя		
Испытания земляного полотна естественного сложения (август 2010)						
1	40,5	-	-	40,5	0,72	25,81
2	40,2	-	-	40,2	0,72	26,12
3	39,6	-	-	39,6	0,71	26,45
Испытания земляного полотна естественного сложения (август 2017)						
1	23,35	21,26	18,76	21,12	0,38	33,96
2	21,35	20,62	18,24	20,07	0,36	31,37
3	23,8	22,11	20,12	22,01	0,39	31,40
Испытания земляного полотна после первого увлажнения (август 2017)						
1	32,27	27,06	26,28	28,54	0,51	31,19
2	31,38	27,78	25,93	28,36	0,51	29,20
3	31,34	28,91	26,94	29,06	0,52	27,11
Испытания земляного полотна после второго увлажнения (сентябрь 2017)						
1	44,58	43,26	41,94	43,26	0,77	20,09
2	41,71	39,65	37,90	39,75	0,71	25,74
3	43,07	42,53	41,39	42,33	0,76	25,84
Испытания земляного полотна после третьего увлажнения (сентябрь 2017)						
1	35,38	34,02	32,66	34,02	0,61	26,35
2	38,39	35,11	31,83	35,11	0,63	29,25
3	36,86	35,57	34,27	35,57	0,64	26,46
Испытания земляного полотна в процессе осеннего влагонакопления (октябрь 2017)						
1	45,66	45,94	43,33	44,98	0,80	20,00
2	51,10	42,20	33,33	42,21	0,75	21,33
3	54,11	45,07	34,27	44,48	0,79	22,08
4	45,21	44,03	41,64	43,63	0,78	21,93

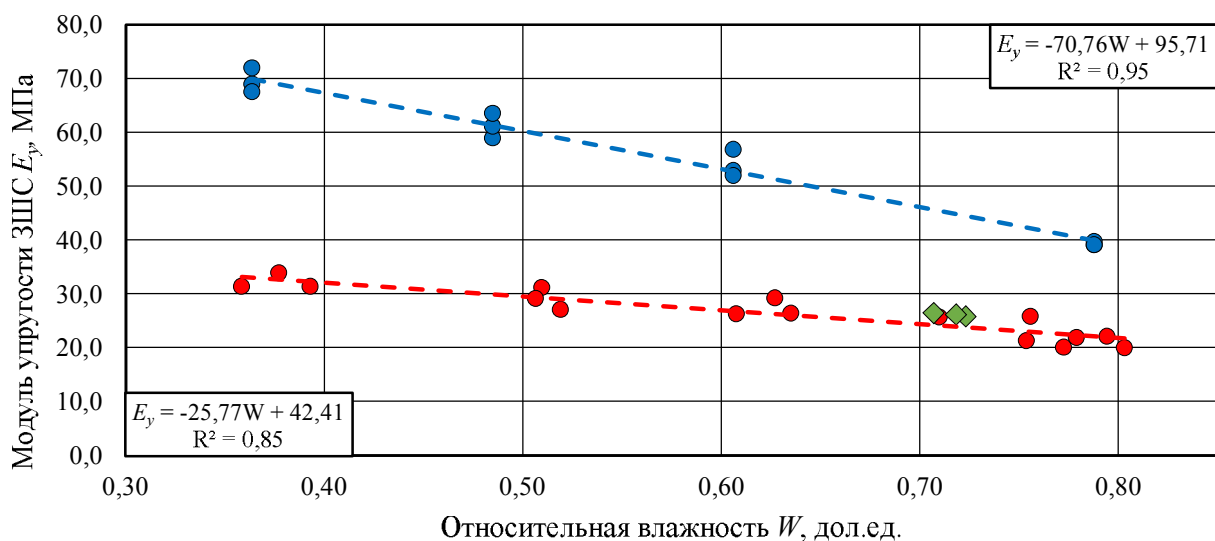


Рис. 4. Графики изменения модуля упругости при изменении влажности ЗШС:

- – значения модуля упругости ЗШС на опытном участке при разной влажности (2017 г.);
- ◆ – то же при первом испытании насыпи из ЗШС (в 2010 г.);
- – значения модуля упругости ЗШС при разной влажности, полученные в лабораторных условиях

На графиках виден близкий характер закономерностей изменения значений модуля упругости при росте влажности ЗШС, полученного в лабораторных условиях и на опытном участке. Снижение модуля упругости ЗШС в ходе натурального эксперимента составило 0,27 МПа при повышении относительной влажности на 0,01. Снижение модуля упругости ЗШС в рамках лабораторного исследования оказалось гораздо больше – 0,72 МПа на каждые 0,01 увеличения относительной влажности.

Таким образом, обе зависимости показывают устойчивое падение несущей способности (E_y) ЗШС при её дополнительном увлажнении, особенно при величине относительной влажности 0,7 и более. При этом следует отметить, что столь высокое водонасыщение ЗШС было осуществлено искусственно, из условий эксперимента. В реальных условиях происходит сброс воды из массива ЗШС до уровня относительной влажности 0,30–0,35, при котором несущая способность сооружения является максимальной (в рамках текущего исследования). Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют, что при отсыпке насыпи из ЗШС «на воду», или при длительном подтоплении такой насыпи несущая способность нижних слоёв, находящихся в воде, будет достаточно мала. В этих случаях могут быть использованы различные способы повышения несущей способности ЗШС, например, способ, рекомендованный нами в патенте № 2614236 [20].

Сопоставление результатов определения модуля упругости ЗШС на лабораторных образцах по методике ВСН 29-76 [18] и на опытном участке (по методике ОДМ 218.5.007-2016 [13]) свидетельствует, что лабораторные испытания могут дать общую закономерность изменения параметра (E_y) под воздействием какого-либо фактора (W), однако численные значения этого параметра, полученные на лабораторных образцах, можно использовать при расчётах несущей способности дорожных конструкций с осторожностью. Это связано с масштабным фактором при испытаниях в лаборатории, влиянием жёсткой формы, в которой находится лабораторный образец при нагружении штампом. Кроме того, структура (а значит и свойства) образцов, уплотнённых прессованием или ударной нагрузкой, отличается от аналогичных образцов, полученных методами уплотнения, применяемыми на дороге (укатка, вибрация).

Испытания показали, что в целом исследованная ЗШС соответствует среднедеформируемым грунтам по Российской классификации, в то время, как по результатам опытов *Martin et al.* она может быть классифицирована, как малосжимаемый (с высокой жёсткостью) грунт [21].

Подводя итоги, можно констатировать, что несущая способность (E_y) насыпи из ЗШС от сжигания углей Экибастузского бассейна не ниже, чем насыпи, построенной из большинства природных грунтов (кроме средних и более крупных песков) при любой реально достижимой степени увлажнения.

Выводы. По результатам исследований сделаны следующие краткие выводы:

- влажность оказывает существенное влияние на несущую способность земляного полотна автомобильной дороги из золошлаковой смеси. При возрастании влажности до максимального в рамках программы испытаний значения происходит падение модуля упругости в 1,5 раза для натурального эксперимента, и в 1,8 раза для лабораторного эксперимента.

- закономерность снижения несущей способности ЗШС при росте влажности имеет схожую тенденцию, как в лабораторных, так и натуральных экспериментах. Но при росте относительной влажности на 0,01 модуль упругости при натуральных испытаниях уменьшается на 0,27 МПа (0,8 %), а при лабораторных испытаниях уменьшается на 0,72 МПа (1,03 %);

- численные значения модулей упругости, полученные в лаборатории значительно выше, чем определённые в полевых условиях, что связано с использованием малого штампа, жёсткой металлической формы в ходе лабораторных испытаний, разной структурой образцов;

- характер снижения несущей способности (E_y) ЗШС при увлажнении имеет сходство с падением несущей способности природных грунтов при увлажнении;

- золошлаковые смеси от сжигания Экибастузских углей, относятся к среднедеформируемым грунтам и могут выступать как техногенный грунт для возведения земляного полотна автомобильных дорог с позиции механических свойств.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-48-550508 p_a). Научные исследования выполнены за счёт средств бюджета Омской области.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толстой А.Д., Ковалева И.А., Новиков К.Ю. Совершенствование состава и свойств порошковых бетонов с техногенным сырьем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №2. С. 19–24.
2. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. М.: Изд -во Союздорнии, 2003. 58 с.

3. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. [Online] URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm> (date of reference: 28.09.2017).
4. Collins R.J., Srivastava L. Use of Ash in Highway Construction: Delaware Demonstration Project, Final Report. Electric Power Research Institute, Report No. GS-6540, Palo Alto, California, November, 1989. 126 p.
5. Brendel G.F., Glogowski P.E. Ash Utilization in Highways: Pennsylvania Demonstration Project. Electric Power Research Institute, Report No. GS-6431, Palo Alto, California, June 1989. 132 p.
6. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khurana S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective // Resources Policy. 2016. Vol. 49. Pp. 334–348.
7. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1558–1562.
8. Pandian N.S. Fly ash characterization with reference to geotechnical application // Journal Indian Institute of Science. Vol. 84. Pp. 189–216.
9. Pal S. K., Ghosh A. Shear strength behavior of Indian flu ashes. Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE). Vol. 1. Pp. 18–22.
10. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима: дисс.... канд. техн. наук. Омск. 2015. 165 с.
11. Костерин Э.В. Методические указания к лабораторной работе «Определения штамповыми испытаниями модуля деформации песчаного основания и распределения в нем напряжений». Омск: Изд. СибАДИ, 1993. 12 с.
12. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ, 2016. 20 с.
13. ОДМ 218.5.007-2016. Методические рекомендации по определению модуля упругости статическим штампом. М.: ФГУП ИНФОРМАВТОДОР, 2016. 24 с.
14. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков А.Г. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. 2014. № 5–6. С. 98–108.
15. Toth P.S., Chan H.T., Cragg C.B., Coal ash as structural fill with special reference to Ontario experience // Canadian Geotechnical Journal. Vol. 25 Pp. 694–704.
16. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Изд-во Высшая школа, 1968. 626 с.
17. Барац Н.И. Инженерно-геологические условия г. Омска и их изменение в результате деятельности человека: дис.... канд. г-м. наук. Москва, 1974. 174 с.
18. ВСН 29-76. Технические указания по оценке и повышению технико-эксплуатационных качеств дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1977. 102 с.
19. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 103–110.
20. Пат. 2614236 Российская Федерация, МПК Е 02 В 3/06. Способ формирования набережных с использованием пульпы золошлаковых отходов / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СибАДИ". № 2015149068, заявл. 16.11.2015; опубл. 23.03.2017, Бюл. № 9. 1 с.
21. Martin J.P., Collins R.A., Browning J.S., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments // Energy. Vol. 116(2). Pp. 71–86.

Информация об авторах

Лунёв Александр Александрович, аспирант кафедры «Проектирование дорог».

E-mail: lunev.al.al@gmail.com.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет.

Россия, 644080, Омск, пр. Мира, д. 5.

Сиротюк Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование дорог».

E-mail: sirvv@yandex.ru.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет.

Россия, 644080, Омск, пр. Мира, д. 5.

Поступила в октябре 2017 г.

© Лунёв А.А., Сиротюк В.В., 2017

Lunev A.A., Sirotuk V.V.

**THE EFFECT OF CHANGES HUMIDITY ON THE BEARING CAPACITY
OF THE EMBANKMENTS BUILT FROM COAL ASH AND SLAG MIXTURE**

For full-scale use of waste thermal power plants – ash and slag mixtures, as a building material for the roadbed of highways, it is necessary to justify their mechanical characteristics, in particular – the modulus of elasticity of this man-made soil and its variation depending on humidity. This article presents the results of experimental studies to determine the load-bearing capacity (modulus of elasticity) of the embankment of the earth bed from the ash and slag mixture from the combustion of Coal of the Ekibastuz Basin. In the research, stamping tests of the roadbed with different humidity were carried out. As a result, the magnitude of the modulus of elasticity of the ASM in the body of the embankment is established as a function of the moisture content of this man-made soil. In addition, a comparison between the results of determining the values of this index obtained on laboratory samples and in full-scale conditions was carried out.

Keywords: *highway, embankments, ash and slag mixture, bearing capacity, Young's modulus.*

Information about the authors

Lunev Aleksandr Aleksandrovich, Postgraduate student.

E-mail: lunev.al.al@gmail.com.

Siberian State Automobile and Highway University.

Russia, 644080, Omsk, pr. Mira, 5.

Sirotyuk Viktor Vladimirovich, PhD, Professor.

E-mail: sirvv@yandex.ru

Siberian State Automobile and Highway University.

Russia, 644080, Omsk, pr. Mira, 5.

Received in October 2017

© Lunev A.A., Sirotuk V.V., 2017